

学校编码：10384

密级_____

学 号：22420101151326

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

夏季极地海洋的初级生产力

Primary production in the polar seas in summer

许新雨

指导教师姓名：郭劳动 教 授

陈 敏 教 授

专 业 名 称：海 洋 化 学

论文提交日期：2013 年 05 月

论文答辩时间：2013 年 06 月

2013 年 06 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为(海洋与地球学院同位素海洋化学)课题(组)的研究成果,获得(同位素海洋化学)课题(组)经费或实验室的资助,在(海洋与地球学院同位素海洋化学)实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ☒ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

目 录

摘要.....	1
Abstract.....	2
第 1 章 绪论	4
1.1 引言	4
1.2 初级生产力的定义.....	4
1.3 影响初级生产力的环境因子	5
1.3.1 光.....	5
1.3.2 温度.....	6
1.3.3 营养盐.....	6
1.3.4 铁.....	7
1.3.5 其他因素.....	7
1.4 极地海洋初级生产力的研究	8
1.5 初级生产力的测定方法	9
1.5.1 ^{14}C 示踪法	9
1.5.2 ^{13}C 示踪法	11
1.5.3 叶绿素同化指数法.....	11
1.5.4 卫星遥感法.....	12
1.6 本研究目标及内容	13
第 2 章 普里兹湾及其邻近海域的初级生产力	14
2.1 引言	14
2.2 材料与方法	14
2.2.1 样品采集.....	14
2.2.2 初级生产力的测定.....	15
2.2.3 物理化学要素的测定.....	16
2.3 结果	17

2.3.1 P2 断面	17
2.3.2 P3 断面	18
2.3.3 P4 断面	20
2.3.4 IS 断面	21
2.4 讨论	32
2.4.1 初级生产力水平.....	32
2.4.2 初级生产力的空间分布.....	34
2.4.3 初级生产力与营养盐、荧光强度的关系.....	36
2.4.4 水体垂直稳定度对初级生产力的影响.....	39
2.5 结论	40
第 3 章 北极与亚北极海域初级生产力的分布及其调控机制.....	41
3.1 引言	41
3.2 材料与方法	43
3.2.1 样品采集.....	43
3.2.2 初级生产力的测定.....	43
3.2.3 物理化学要素的测定.....	45
3.3 结果	46
3.3.1 楚科奇陆架-加拿大海盆北部断面（SR 断面）	46
3.3.2 楚科奇海断面（R 断面）	47
3.3.3 南楚科奇海陆架中部断面（C1 断面）	49
3.3.4 南楚科奇陆架北部断面（C2 断面）	50
3.3.5 巴罗断面（S 断面）	52
3.3.6 白令海峡断面（BS 断面）	53
3.3.7 白令海断面（B 断面）	54
3.3.8 加拿大海盆北部站位.....	55
3.4 讨论	75
3.4.1 海冰融化对水文学特征的影响.....	75
3.4.2 初级生产力的空间分布.....	77

3.4.3 楚科奇陆架初级生产力的时间变化: R 断面和 SR 断面的对比	79
3.4.4 初级生产力的影响因素.....	81
3.4.4.1 主要营养盐的影响.....	81
3.4.4.2 水体垂直稳定性的影响.....	82
3.4.4.3 荧光强度与初级生产力的关系.....	83
3.5 结论	83
第 4 章 结论	85
4.1 夏季普里兹湾及其邻近海域的初级生产力	85
4.2 夏季北极与亚北极海域的初级生产力	85
参考文献	87
附录: 在学期间所做的主要工作	97
致谢.....	98

Contents

Chinese abstract	1
English abstract	2
Chapter 1 General introduction	4
1.1 Introduction	4
1.2 Definition of primary production	4
1.3 Factors controlling primary production in the ocean	5
1.3.1 Light	5
1.3.2 Temperature	6
1.3.3 Nutrients	6
1.3.4 Iron	7
1.3.5 Other factors	7
1.4 Primary production in the polar seas	8
1.5 Methods	9
1.5.1 ^{14}C tracer	9
1.5.2 ^{13}C tracer	11
1.5.3 Assimilation index	11
1.5.4 Satellite remote sensing	12
1.6 Research purposes and contents	13
Chapter 2 Primary production in the Prydz Bay and its adjacent sea areas	14
2.1 Introduction	14
2.2 Materials and method	14
2.2.1 Locations and sampling	14
2.2.2 Determination of primary production	15
2.2.3 Determination of hydrochemical parameters	16
2.3 Results	17

2.3.1 Section P2	17
2.3.2 Section P3	18
2.3.3 Section P4	20
2.3.4 Section IS	21
2.4 Discussion	32
2.4.1 Primary production level	32
2.4.2 Spatial distribution of primary production	34
2.4.3 Influence of nutrients and fluorescence on primary production	36
2.4.4 Influence of the water vertical stability on primary production	39
2.5 Conclusion	40
Chapter 3 Primary production in the arctic and sub-arctic seas	41
3.1 Introduction	41
3.2 Materials and method	43
3.2.1 Locations and sampling	43
3.2.2 Determination of primary production	43
3.2.3 Determination of hydrochemical parameters	45
3.3 Results	46
3.3.1 Section SR	46
3.3.2 Section R	47
3.3.3 Section C1	49
3.3.4 Section C2	50
3.3.5 Section S	52
3.3.6 Section BS	53
3.3.7 Section B	54
3.3.8 Stations in the northern Canada Basin	55
3.4 Discussion	75
3.4.1 Influence of sea ice melting on hydrological characteristics	75
3.4.2 Spatial distribution of primary production	77

3.4.3 Temporary variation of primary production: comparison between section R and section SR	79
3.4.4 Factors controlling primary production	81
3.4.4.1 Main nutrients	81
3.4.4.2 The water vertical stability	82
3.4.4.3 Relationship between fluorescence and primary production	83
3.5 Conclusion	83
Chapter 4 Conclusions	85
4.1 Primary production in the Prydz Bay and its adjacent sea areas	85
4.2 Primary production in the arctic and sub-arctic seas	85
References	87
Appendixes	97
Acknowledgements	98

摘要

利用 ^{14}C 示踪法实测了普里兹湾及其邻近海域、北极与亚北极海域 2010 年夏季的初级生产力，得到主要结果如下：

普里兹湾及其邻近海域的积分初级生产力介于 $91.6\sim 959.6\text{ mg/m}^2/\text{d}$ 之间，平均为 $342.1\text{ mg/m}^2/\text{d}$ 。初级生产力的空间分布呈现湾内冰边缘区和陆架区高于湾外陆坡区和深海区的特征， 67° S 附近海域是湾内、外初级生产力变化剧烈的锋面。对初级生产力和环境因子的关系进行分析表明，冰边缘区和陆架区较高的初级生产力主要与海冰融化所导致的水体垂直稳定性的增强和大量冰藻的释放有关，而陆坡区和深海区的初级生产力受水体垂直稳定性的影响不大，而是受到 Fe 的限制。整个研究海域的初级生产力受生物量的影响较大，营养盐不是研究海域初级生产力的限制因子，在三种主要营养盐（总溶解无机氮、活性磷酸盐和活性硅酸盐）中，活性磷酸盐最有可能成为初级生产力的潜在限制因子。

北极和亚北极海域（包括白令海、白令海峡、楚科奇陆架、门捷列夫海脊、波弗特海和加拿大海盆北部海域）的初级生产力介于 $0\sim 12.914\text{ mg/m}^3/\text{h}$ 之间，平均值为 $0.543\text{ mg/m}^3/\text{h}$ ，积分初级生产力介于 $3.4\sim 2950.3\text{ mg/m}^2/\text{d}$ 之间，平均为 $262.6\text{ mg/m}^2/\text{d}$ 。初级生产力的空间分布具有如下特征：白令海峡>白令海陆架>楚科奇陆架>白令海海盆>加拿大海盆北部海域>波弗特海>门捷列夫海脊。初级生产力的空间分布受到主要营养盐的影响，且楚科奇陆架、波弗特海、门捷列夫海脊和加拿大海盆北部海域表层水体的初级生产力可能受到 DIN 的限制。水体垂直稳定性通过影响主要营养盐的补充，间接对初级生产力造成影响。楚科奇陆架断面 7 月份的初级生产力高于 8 月底时的初级生产力，反映出海冰融化初期加强的水体垂直稳定性有利于浮游生物的光合作用。

关键词：初级生产力；水体垂直稳定性；营养盐；普里兹湾；西北冰洋；白令海

Abstract

Primary production in the Prydz Bay and its adjacent sea areas and the arctic and sub-arctic seas in the austral and northern summer was measured using the ^{14}C tracer method. The major results are as follow.

The integrated primary production in the Prydz Bay and its adjacent sea areas ranged from 91.6 to 959.6 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{d}$ with an average of 342.1 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{d}$. Primary production in the Amery Ice Shelf frontal zones and the continental shelves were higher than those in the continental slope and the open ocean. A front of primary production between the Prydz Bay and the northern open ocean formed around 67° S . The primary production in the Prydz Bay was affected by the water vertical stability and the ice algae released by sea ice melting, but not persist in the open ocean, which was limited by low Fe concentrations. The biomass is another factor controlling primary production in our study areas. The main nutrients (DIN , PO_4^{3-} and SiO_3^{2-}) were not the limiting factors for the primary production in the Prydz Bay and its adjacent sea areas. Comparatively, the $\text{PO}_4\text{-P}$ was most likely to be the potential limiting factor for the primary production in the study sea areas.

The primary production and the integrated primary production in the arctic and sub-arctic seas ranged from 0 to 12.914 $\text{mg}/\text{m}^3/\text{h}$ and 3.4 to 2950.3 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{d}$, with an average of 0.543 mg/m^3 and 262.6 $\text{mg}/\text{m}^2/\text{d}$, respectively. The primary production showed a spatial variation with a characteristics as follow: the Bering Strait > the Bering shelf > the Chukchi shelf > the Bering basin > the northern region of the Canada Basin > the Beaufort sea > the Mendeleev ridge. The spatial distribution of primary production was controlled by the main nutrients with the surface primary production was limited by DIN. Primary production was affected by the water vertical stability by controlling the supply of the nutrients. The primary production in the Chukchi shelf in July was higher than those in the late August, indicating the enhanced water vertical stability during the beginning of sea ice melting was

favorable to phytoplankton photosynthesis.

Key words: primary production; the water vertical stability; nutrients; the Prydz Bay and its adjacent areas; the western Arctic Ocean; the Bering Sea

第1章 绪论

1.1 引言

自从 Nielsen (1952) 开始使用 ^{14}C 示踪方法开展初级生产力的研究以来, 有关海洋初级生产力的认识获得了长足的进步。Mishke 等 (1970) 根据全球海洋 7000 多个测站获得的数据, 将其分成 5 种类型进行统计, 进而绘制出全球海洋初级生产力的分布图。各国学者也广泛应用 ^{14}C 示踪法实测了全球大部分海域的初级生产力, 但由于受现场调查航次等限制, 难以获得高时空密度的初级生产力数据, 由此导致对初级生产力的长期变化和限制因素等缺乏深入的认识。近年来, 随着卫星遥感技术的蓬勃发展, 通过卫星遥感测量海洋初级生产力已没有时间、地点的限制, 但由于卫星遥感方法本身存在的不准确性, 不同模型和算法得到的结果一致性不高, 且其与现场实测数据存在较大差异, 目前尚无法替代现场实测的研究。

近年来, 全球气候变暖以及由其带来的南北极海冰融化等问题受到人们越来越多的关注, 全球碳、氮循环和生物泵运转等科学问题也成为了研究的热点, 初级生产力在这些问题中都扮演着重要的角色。初级生产力供应着所有海洋生物的能量, 参与海洋生物泵过程, 并调控着大气 CO_2 和 O_2 的浓度, 因此研究初级生产力无论对海洋渔业资源开发, 还是海洋生物泵研究, 亦或是全球气候变暖等问题, 都有重要的意义。我国初级生产力的研究也取得丰硕成果, 研究海域包括厦门湾、胶州湾等海湾, 南海、东海、黄海、渤海等边缘海, 以及南大洋、北冰洋等极地海洋 (蔡昱明, 2005; 陈兴群等, 2007; 高爽, 2009; 黄邦钦, 2005; 焦念志, 1993; 林志裕等, 2012; 刘华雪等, 2011; 刘子琳等, 2006; 宁修仁等, 2000; 宋星宇等, 2011; 孙松, 2005; 孙晓霞等, 2011; 王桂云等, 1984; 杨东方等, 2006)。

1.2 初级生产力的定义

海洋初级生产力 (以下简称初级生产力) 是指, 海水中的浮游植物、底栖植物和自养细菌等通过光合作用固定 CO_2 并制造有机物的能力, 通常以 $\text{mgC}/\text{m}^3/\text{h}$

或 $\text{mgC}/\text{m}^3/\text{d}$ 表示。初级生产力(primary production)包括新生产力(new production)和再生生产力(recycled production),其中新生产力是指真光层外部来源的营养盐(通常是 NO_3^-)所支持的那部分初级生产力,而再生生产力是真光层内部来源的营养盐(通常是 NH_4^+)所支持的那部分初级生产力(Chavez 等, 2011)。由初级生产力的概念还可以衍生出总初级生产力(GPP)和净初级生产力(NPP),GPP 是指自养生物制造的有机碳的总量,由 GPP 减去呼吸作用所消耗的碳,就得到 NPP,其中呼吸消耗约占 GPP 的 10%。海洋的 NPP 可达 $5 \times 10^6 \text{ gC/a}$ (Field 等, 1998),与陆地生态系统的 NPP 相当(Field 等, 1998; Zhao 和 Running, 2010),海洋 NPP 中新生产力约占 1/5(Chavez 等, 1994)。

海洋光合作用的主要贡献者是海水中漂浮的或者游泳能力很弱的浮游植物,这些浮游植物包括很多种类,从蓝细菌到真核生物,大小变化从小于 $1 \mu\text{m}$ 到大于 $100 \mu\text{m}$ 不等(Chavez 等, 2011),因而在测量初级生产力时,主要测量的就是浮游植物的生产力。

1.3 影响初级生产力的环境因子

1.3.1 光

光照对初级生产力的影响主要表现在其对光合作用速率的影响,在一定范围内,光合作用速率随着光照强度的增加呈线性增加,达到最高点(P_{max})后保持短暂的不变,之后随光强的进一步增加而降低。有些海区初级生产力的垂直分布呈现次表层极大值的分布,其可能原因之一就在于表层初级生产力受到了强光照的抑制。光照对初级生产力的控制可以从初级生产力的垂直分布规律得到印证,一般而言,初级生产力随着深度的增加而降低,当达到表层光照强度的 1%深度时,初级生产力往往接近于 0。此外,一天当中不同时间段测得的初级生产力变化很大,也说明光照强度对初级生产力的影响较大(邱雨生等, 2004)。

对于中低纬度海域,表层光照强度一般都高于浮游植物生长所需的饱和光照强度,因而不会造成光限制的情况(杨东方等, 2007),但对于常年被冰雪覆盖的极地海域,由于冰面的强烈反射作用,太阳辐射较难进入冰下水体,因而初级生产力有可能受到光的限制。

光照不仅影响光合作用活性,而且可对海洋化学环境产生一定的影响。例如,光照可将部分 Fe^{3+} 转化成 Fe^{2+} , 从而增加铁的溶解度和生物利用性(Sun 等, 2009), 进而可影响初级生产力。

1.3.2 温度

温度是一切酶促反应的控制因子,尤其是对光合作用暗反应阶段的各种酶促反应影响很大。在一定温度范围内,温度每上升 10°C , 代谢作用的速率就增加 2~3 倍。在实验室研究浮游植物生长速率和温度的关系发现,碳同化速率和温度呈对数相关关系(杨东方等, 2007)。

温度还可以通过影响水体垂直稳定性来影响初级生产力。当表层水体温度较高时,就会形成较强的温盐跃层。水体稳定性强,在一定程度上对初级生产力是有促进作用的。但与此同时也会阻碍营养盐向表层的运输,当表层营养盐被消耗殆尽时,强的水体层化作用就对初级生产力产生了抑制作用(Cai 等, 2003; 蔡平河, 2000)。

长期的温度变化还可以改变浮游植物的群落结构和优势种。当水温升高时,浮游植物的冷水性藻类可被暖水性藻类所替代,从而引起海洋浮游植物群落结构的改变(杨东方等, 2007)。

1.3.3 营养盐

营养盐是浮游植物生长所必需的营养物质,主要包括硝酸盐、铵盐、亚硝酸盐、磷酸盐和硅酸盐。近岸的初级生产力往往高于开阔大洋区,这一典型分布规律就与营养盐分布密切相关。营养盐的限制一般发生在春季或夏季水华和赤潮爆发的时候,由于浮游植物的爆发式增长,水体中营养盐迅速下降,同时营养盐的供应跟不上其被消耗的速度,从而形成营养盐的限制。在主要营养盐中,氮营养盐是最常见的限制因素(Lee Chen, 2005),但在某些硅藻为优势种的海区,硅酸盐浓度可能也很重要(杨东方, 2000)。具体是哪种营养盐限制,还要根据不同海区的优势种对各种营养盐的需求量来定。尽管真光层中细胞生长所需的营养盐很少,但营养盐的补给速率对 PP 起到关键性的作用。高纬度海域冬季温盐跃层消失,水体垂向混合加强,为真光层提供了丰富的营养盐,并导致春季初级生

产力的明显提高；对于中低纬度海域，风驱动引发的上升流或温盐跃层的变浅，也会引起 PP 的升高（Chavez 等，2011）。

1.3.4 铁

铁是浮游植物生长必需的一种痕量金属元素，浮游植物生长过程中的许多生化反应都需要铁的参与，因此铁和硝酸盐、磷酸盐、硅酸盐一样，也可以成为某些海域初级生产力的限制因子。此外，海水铁浓度的变化会影响浮游植物对 Si 和 N 的吸收，当铁浓度下降时，生物吸收的 Si/N 比值会增加；铁浓度增加时，生物吸收的 Si/N 比值会降低（Sun 等，2009）。

Martin 在 20 世纪 90 年代提出了海洋“铁假说”，即在亚北极太平洋、赤道东太平洋和南大洋等高营养盐低叶绿素（HNLC）海区施加铁的话，可以促进浮游植物的生长，加速碳从海洋表层向深层的输出，最终可降低大气 CO₂ 含量，缓解温室效应（Martin, 1990）。此后，在这些 HNLC 海区进行的现场铁施肥实验证明，加入铁以后，这些海区的浮游植物生物量有所增加，N 和 P 等营养盐被消耗，但是否能有效缓解温室效应仍未能证实（屠霄霞，2007）。由此可见，铁对初级生产力的影响，尤其是在 HNLC 海域，是非常重要的。

1.3.5 其他因素

除上述因素会对初级生产力产生影响外，还有其他一些因素会对初级生产力造成影响，而且这些影响往往是通过调控营养盐的供给来实现的，如水体的垂直稳定性、涡旋、上升流等物理海洋学过程，以及浮游动物对浮游植物的捕食作用等（Cai 等，2003；Falkowski 等，1991；Karl, 2002；Oschlies 和 Garcon, 1998；Popova 等，2012；蔡平河，2000；郝铨等，2011）。

需要指出的是，短期的气候变化对初级生产力也会产生一定影响。如厄尔尼诺现象会引起温跃层的变化，从而改变海域的营养盐和 PP 水平，这种影响在上升流海域更为显著。全球 NPP 的年际间变化在 $\pm 2 \text{ Pg}$ ($1 \text{ Pg} = 10^{15} \text{ g}$) 之间，但在厄尔尼诺（1997~1998）期间，NPP 可减少 4 Pg ，是非厄尔尼诺期间的两倍（Chavez 等，2011）。此外，气候变化还会影响铁的大气沉降通量，进而影响海洋的生物固氮作用和初级生产力（Chavez 等，2011）。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

廈門大學博